

## PRIMJENA NAVAL HYDRO PAKETA ZA PRORAČUN VALNIH OPTEREĆENJA

Gatin, I., Vukčević, V. & Jasak, H.

**Sažetak:** Ovaj rad prikazuje mogućnosti primjene programskog paketa `NavalHydro` u programu `OpenFOAM` na probleme određivanja valnih opterećenja u brodogradnji. Diskretizacija Navier-Stokesovih jednadžbi se provodi metodom kontrolnih volumena, dok se za praćenje slobodne površine koristi „Volume of Fluid“ metoda.

Paket `NavalHydro` prilagođen je provođenju proračuna gdje su prisutni značajni utjecaji slobodne površine, što ga čini pogodnim za određivanje valnih opterećenja. U ovom radu je prikazan proračun opterećenja vertikalnog cilindra uslijed nailaska harmonijskih valova. Rezultati su uspoređeni s eksperimentalnim podacima. Uz to je prikazana simulacija ekstremnog vala (eng. „*freak wave*“), koja pokazuje mogućnost određivanja opterećenja uslijed ovakvih pojava.

**Ključne riječi:** Računalna dinamika fluida, valna opterećenja, ekstremni val, *Volume of Fluid*, *OpenFOAM*

### 1 UVOD

Proračun valnih opterećenja na nepomične konstrukcije te ostale objekte pomorske tehnike predstavlja složen problem. Valna opterećenja predstavljaju dominirajući projektni parametar prilikom projektiranja pučinskih nepomičnih objekata. Velik dio problema vezan za valna opterećenja nije moguće izračunati pomoću konvencionalnih linearnih potencijalnih metoda. Zbog toga se u ovom radu ispituje mogućnost korištenja računalne dinamike fluida (eng. „*Computational Fluid Dynamics*“, CFD) u svrhu opisivanja pojava vezanih uz valna opterećenja.

Ovaj rad je organiziran na sljedeći način. U sljedećem poglavlju su kratko opisane matematičke jednadžbe na kojima se zasnivaju proračuni. Tu su obuhvaćene Navier-Stokesove jednadžbe i jednadžba na kojoj se temelji „Volume of Fluid“ metoda. Kratko je opisana i metoda modeliranja valova. U trećem poglavlju dani su rezultati provedenih simulacija. Prvom simulacijom se provodio proračun opterećenja vertikalnog cilindra u polju pravilnih harmonijskih valova, dok se u drugoj simulirao ekstremni val (eng. „*freak wave*“). Na kraju je dan zaključak.

### 2 MATEMATIČKI MODEL

Strujanje viskoznog fluida opisano je Navier–Stokesovim jednadžbama koje predstavljaju zakon očuvanja količine gibanja, te jednadžbom kontinuiteta koja predstavlja zakon očuvanja mase. Ovdje su ukratko opisane spomenute jednadžbe te je dan kratki prikaz formulacije modela indikatorske funkcije korištene za „Volume of Fluid“ metodu. Kratko je prikazan i korišten način modeliranja valova.

## 2.1 Navier-Stokesove jednadžbe

Nestlačivo viskozno strujanje je opisano jednadžbom očuvanja mase i Navier-Stokesovim jednadžbama koje predstavljaju zakon očuvanja količine gibanja.

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \nabla \mathbf{U} \cdot \nabla \mu + \sigma \kappa \nabla \alpha, \quad (2)$$

gdje je  $\mathbf{U}$  polje brzine,  $p$  je tlak,  $\rho$  je gustoća dok je  $\mu$  dinamička viskoznost.  $\mathbf{g}$  je gravitacijsko ubrzanje.  $\sigma$  je koeficijent površinske napetosti, dok je  $\kappa$  srednja zakrivljenost slobodne površine [1].  $\alpha$  predstavlja vrijednost indikatorske funkcije korištene u „Volume of Fluid“ metodi za modeliranje slobodne površine.

## 2.2 „Volume of Fluid metoda modeliranja slobodne površine

Ova metoda opisuje slobodnu površinu pomoću indikatorske funkcije  $\alpha$  koja predstavlja udio volumena pojedine faze u promatranom kontrolnom volumenu [1]. Svojstva fluida određuju se pomoću funkcije  $\alpha$  pomoću izraza:

$$\rho = \alpha \rho_1 + (1 - \alpha) \rho_2, \quad (3)$$

$$\mu = \alpha \mu_1 + (1 - \alpha) \mu_2. \quad (4)$$

Funcija  $\alpha$  ima sljedeća svojstva:

$$\alpha(\mathbf{x}, t) = \begin{cases} 1, & \text{za točku u fluidu 1,} \\ 0 < \alpha < 1, & \text{za prijelazno područje,} \\ 0, & \text{za točku u fluidu 2.} \end{cases} \quad (5)$$

## 2.3 Modeliranje valova pomoću relaksacijskih zona

Modeliranje valova se provodi stapanjem rješenja potencijalne valne teorije i rješenja koje nudi CFD proračun. U relaksacijskim zonama se vrši postepen prijelaz sa jednog na drugo rješenje [2]. Relaksacijske zone koriste se i za sprječavanje refleksije valova od kraja domene.

# 3 REZULTATI SIMULACIJA

U ovom poglavlju pokazani su rezultati simulacija provedenih za ovaj rad. U prvoj simulaciji vertikalni cilindar izložen je pravilnim harmonijskim valovima te su dobivene sile opterećenja uspoređene s eksperimentalnim podacima. Druga simulacija prikazuje mogućnost proračuna opterećenja uslijed nailaska ekstremnog vala (eng. „freak wave“).

## 3.1 Simulacija valnih opterećenja vertikalnog cilindra

Provedene su simulacije za pet različitih nailaznih harmonijskih valova te su rezultati uspoređeni s eksperimentalnim podacima iz [3]. Simulacija je u potpunosti provedena u skladu s eksperimentalnim ispitivanjem.

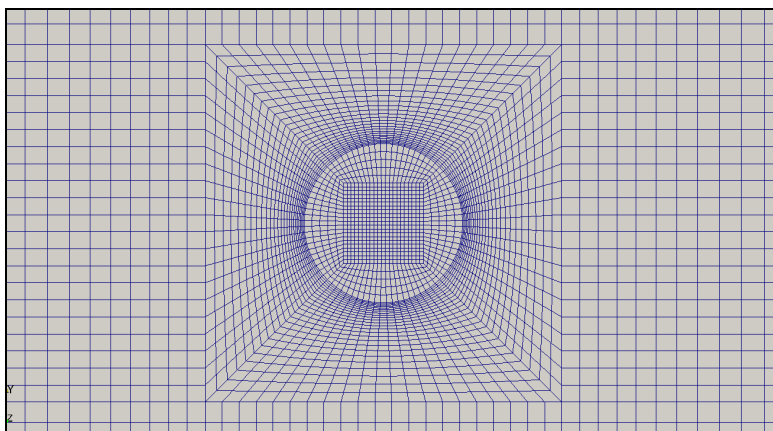
Eksperimentalno ispitivanje provedeno je u bazenu dugačkom 36.5 m, širokom 2.4 m i dubokom 1.5 m. Cilindrični stup uronjen je vertikalno u bazen do dubine od 27 cm. Dakle, cilindar se ne proteže do dna. Promjer cilindra je 89 mm. Cilindar je postavljen na udaljenosti od 13.7 m od generatora valova. Dani su podatci o

maksimalnim silama u smjeru uzdužne osi bazena koji su utvrđeni na temelju mjerenja sile tokom deset perioda vala. U tablici 1 dani su parametri ispitivanih valova. Domena simulacije je smanjena u odnosu na eksperimentalne postavke zbog uštede proračunskog vremena. Valovi su modelirani koristeći relaksacijske zone [4] gdje se nameću brzine iz potencijalne teorije. Na kraju domene postavljena je izlazna relaksacijska zona koja sprječava refleksiju valova o stražnji zid domene.

**Tablica 1. Karakteristike nailaznih valova.**

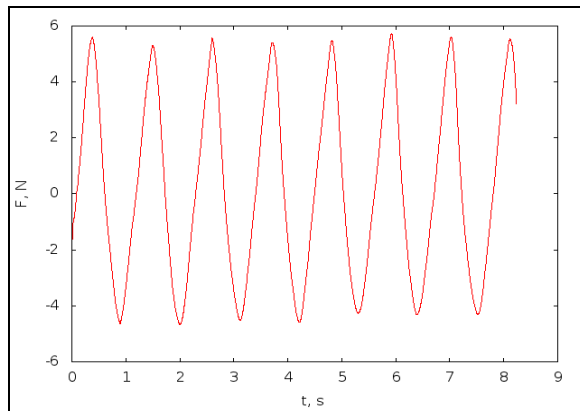
N	Frekvencija $f$ , Hz	Nagib vala $k \cdot \eta_a$ , rad	Valni broj $k$ , rad/m	Valna visina $h$ , m	Valna duljina $\lambda$ , m	Period $T$ , s
1	0.70	0.06	1.97	0.060	3.19	1.43
2	0.70	0.12	1.97	0.120	3.19	1.43
3	0.90	0.20	3.26	0.123	1.93	1.11
4	1.10	0.12	4.87	0.050	1.30	0.90
5	1.43	0.20	8.83	0.049	0.76	0.70

Mreža kontrolnih volumena u blizini cilindra prikazana je na Sl. 1. Korišteno je linearno skaliranje veličina kontrolnih volumena na način da je mreža finija blizu oplakane površine cilindra. Na Sl. 2 je prikazan primjer signala sile dobiven simulacijom za slučaj val broj 3 iz Tablice 1. Za svaki val je iz dobivenog signala određen maksimum sile i uspoređen sa eksperimentalnim podacima. Usporedba rezultata i podaci o pojedinim simulacijama dani su u Tablici 2.



**Sl. 1. Prikaz mreže kontrolnih volumena u blizini cilindra.**

Iz Tablice 2 može se vidjeti da se rezultati vrlo dobro slažu sa eksperimentalnim podacima za prva tri vala. Za valove viših frekvencija odstupanja su veća. Za te valove su stoga provedene simulacije sa profinjenim mrežama što je za val broj 5 dovelo do znatnog smanjenja greške. Treba napomenuti da je mreža od 2 800 000 ćelija još uvijek relativno gruba mreža za promatrani problem. Daljnjim profinjavanjem mreže zasigurno bi se došlo do točnijih rezultata. Rezultati pokazuju zavisnost o vertikalnoj finoći mreže, odnosno o broju ćelija po valnoj visini. Courantov broj također utječe na rezultat.



Sl. 2. Prikaz signala sile za val broj 3.

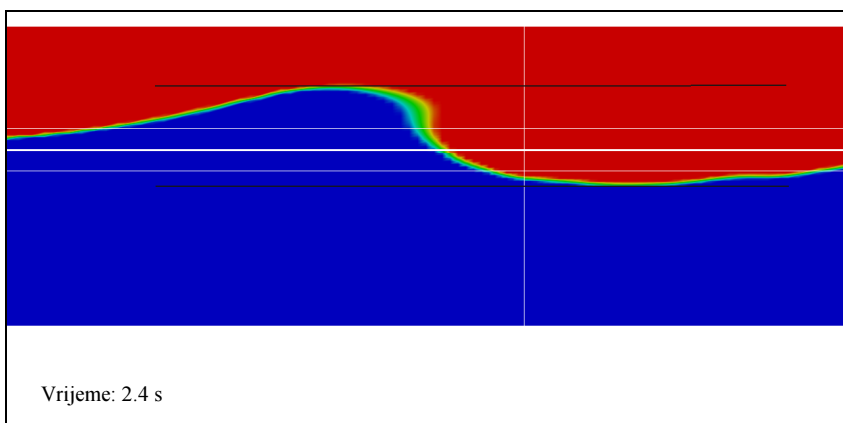
Tablica 2. Usporedba eksperimentalnih podataka i CFD rezultata.

Broj vala $N$	CFD rezultati $F_x$ , N	Eksp. rezultati $F_x$ , N	Relativna pogreška $Err$ , %	Broj ćelija	Courantov broj $Co$
1	1.778	1.80	1.22	1 728 490	6.0
2	4.790	5.00	4.20	1 728 490	6.0
3	5.573	5.70	2.23	1 728 490	2.0
4	2.390	2.80	14.64	1 728 490	1.5
4	2.361	2.80	15.68	2 805 810	1.5
5	2.650	3.08	13.96	1 728 490	2.0
5	2.854	3.08	7.34	2 629 410	2.0

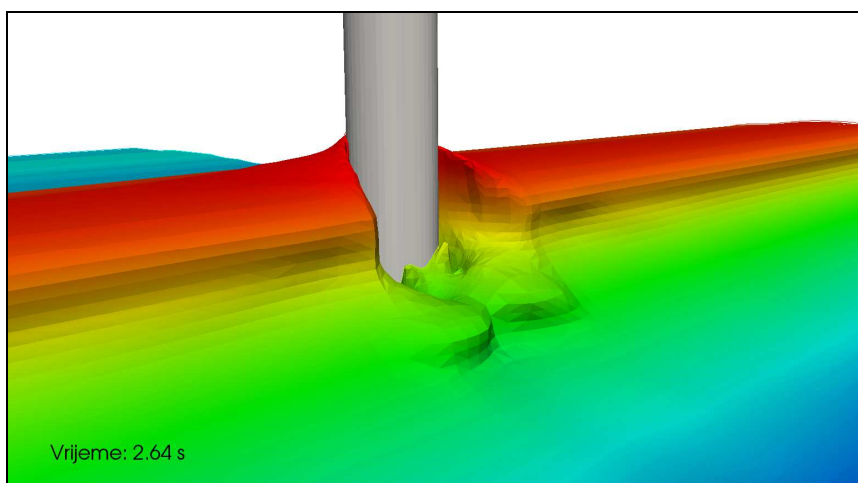
### 3.2. Generiranje ekstremnog vala

Ekstremni val je prema najšire prihvaćenoj teoriji val čija visina premašuje značajnu valnu visinu pripadnog stanja mora za dva ili više puta [5]. U ovom podpoglavlju je prikazana simulacija ekstremnog vala koji je inicijaliziran pomoću standardnog valnog spektra. Ekstremni val dobiven je metodom fokusiranja valova, odnosno linearnom superpozicijom 30 valnih komponenti prema preporuci iz [6]. Amplitude valnih komponenti određene su pomoću Pierson-Moskovitz valnog spektra. Fazni pomaci dobiveni su optimizacijskim alatom na način da se dobije pozitivna superpozicija valnih komponenti na točno željenom mjestu i u željenom trenutku. Korištena je ista domena kao u simulacijama prethodnog podpoglavlja.

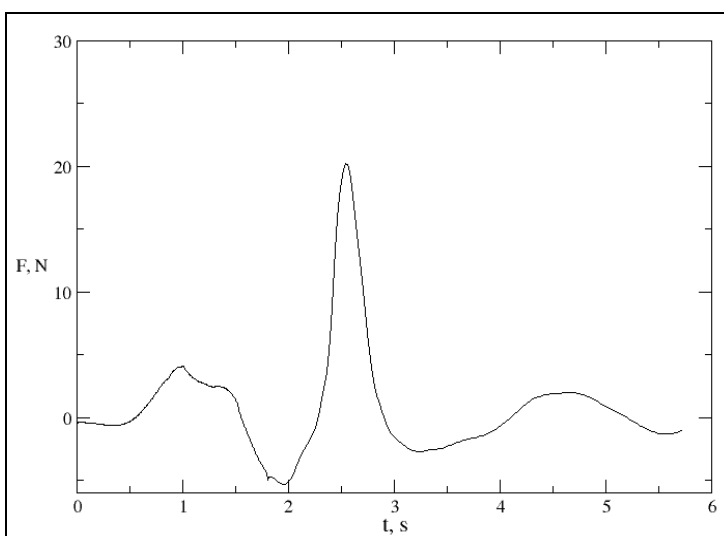
Sl. 3 prikazuje profil vala u simulaciji u trenutku neposredno prije vremena fokusiranja. Plavom bojom prikazano je područje gdje je vrijednost funkcije  $\alpha$  jednaka 1 (voda), dok je crvenom bojom prikazan zrak ( $\alpha = 0$ ). Zelena boja predstavlja prijelazno područje vrijednosti funkcije  $\alpha$ . Na Sl. 3 horizontalna deblja bijela linija označava položaj razine mirne slobodne površine. Tanke bijele horizontalne linije prikazuju pozitivnu i negativnu amplitudu koja odgovara značajnoj valnoj visini. Crne horizontalne linije prikazuju brijeg i dol ekstremnog vala. Razlika u visini je očita, te kvalificira ovaj val kao ekstreman val. Bijela vertikalna linija pokazuje položaj središta cilindričnog stupa, val propagira s lijeva na desno. Sl. 4 prikazuje trenutak udara vala u cilindar. Očito je da je riječ o vrlo nelinearnoj pojavi.



**Sl. 3. Prikaz profila vala u simulaciji.**



**Sl. 4. Prikaz simulacije u trenutku udara ekstremnog vala.**



**Sl. 5. Sila opterećenja cilindra u ovisnosti o vremenu.**

Na Sl. 5 je prikazan iznos sile opterećenja u smjeru uzdužne osi u ovisnosti o vremenu. Vidljivo je da dolazi do vrlo naglog porasta sile, što ovaku pojavu čini iznimno opasnom za pučinske objekte i brodove.

#### 4 ZAKLJUČAK

U ovom radu su prikazane simulacije koje pokazuju mogućnost korištenja CFD proračuna u svrhe rješavanja problema valnih opterećenja. Za diskretizaciju je korištena metoda kontrolnih volumena, dok je za modeliranje slobodne površine korištena metoda "Volume of Fluid"

Simulacije provedene u prvom slučaju prikazanom u podpoglavlju 3.1. pokazuju dobra slaganja s eksperimentalnim podacima. Drugi slučaj pokazuje mogućnost određivanja opterećenja uslijed nailaska ekstremnog vala, što se vrlo teško postiže dosadašnjim metodama. U tom smislu može se reći da se numeričke simulacije u OpenFOAM-u svakako mogu koristiti za svrhe projektiranja objekata morske tehnike. Znatne uštede mogu se postići zahvaljujući smanjenju margina sigurnosti uslijed preciznijeg određivanja ekstremnih opterećenja te manjom cijenom simulacija u odnosu na eksperimentalna ispitivanja.

#### Literatura:

- [1] Ubbink, O., Issa, R. I., "A method for capturing sharp fluid interfaces on arbitrary meshes", Journal of Computational Physics, No. 153, 1999, str. 26-50.
- [2] Jacobsen, N. G., Fuhrman, D. R., Fredsøe, J., "A Wave Generation Toolbox for the Open-Source CFD library: OpenFoam", International Journal for Numerical Methods in Fluids 9, 2012, str.1073 – 1088.
- [3] Boo, S.Y., "Measurements of higher harmonic wave forces on a vertical truncated circular cylinder", Ocean Engineering, 2006, Vol. 33, str. 219-233.
- [4] Jacobsen, N. G., Fuhrman, D. R., Fredsøe, J., "A Wave Generation Toolbox for the Open Source CFD library: OpenFoam", International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2012., Vol. 9, str. 1078-1088.
- [5] Kharif, C., Pelinovsky, E., "Physical mechanisms of the rogue wave phenomenon", European Journal of Mechanics - B/Fluids, 2003, Vol 22, str. 603-634.
- [6] Zhao, X., „Numerical simulation of extreme wave generation using VOF method“, Jurnal of hydrodynamics, 2010, Vol 22, str. 466-477.

#### Autori:

Inno Gatin, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za brodogradnju, Ivana Lučića 5, e-mail: [ig185258@stud.fsb.hr](mailto:ig185258@stud.fsb.hr)

Vuko Vukčević, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zavod za energetska postrojenja, energetiku i ekologiju, Ivana Lučića 5, tel. 01/6168-239, e-mail: [vuko.vukcevic@fsb.hr](mailto:vuko.vukcevic@fsb.hr)

Hrvoje Jasak, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojastva i brodogradnje, Zavod za energetska postrojenja, energetiku i ekologiju, Ivana Lučića 5, tel. 01/6168-239, e-mail: [hrvoje.jasak@fsb.hr](mailto:hrvoje.jasak@fsb.hr)